宁夏典型粮食作物生产水足迹时空演变及节水潜力评价

高亚苗[1,2]， 陈浩楠[1,2]， 王 芳[1,2,3]， 南雄雄[3]， 陈红翔[4]， 李文慧[1,2]

（1. 宁夏大学地理科学与规划学院，宁夏 银川 750021；2. 教育部中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室，宁夏 银川 750021；3. 林木资源高效生产全国重点实验室，宁夏 银川 750002；4. 宁夏师范大学资源环境与生命科学学院，宁夏 固原 756000）

摘 要：近年来，宁夏回族自治区（简称宁夏）粮菜产能显著提升，但其作为全国水资源最匮乏省份之一，评估农业生产水足迹及其节水潜力有助于推进农业水资源可持续利用。以5种典型粮食作物生产水足迹为对象，结合Mann-Kendall趋势检验法探究2006—2020年该区域粮食作物生产水足迹时空演变趋势，利用节水潜力模型进一步揭示作物节水潜力。结果表明：（1）近15 a宁夏典型粮食作物生产水足迹总体呈下降趋势，其中固原市作物生产水足迹下降了42.97%，粮食作物生产蓝绿水足迹总体呈波动变化趋势。（2）各作物生产蓝水和灰水足迹均呈下降趋势。同一作物生产绿水足迹在市际间存在较大差异，大豆对生产绿水足迹贡献率最大。（3）典型年作物生产工程节水潜力、蓝水和绿水真实节水潜力分别可达44.81%、46.43%和45.10%。研究结果可为宁夏节水农业可持续发展提供理论参考。

关 键 词：作物生产水足迹；时空演变；节水潜力；宁夏

文章编号：1000-6060(2024)12-2005-12(2005~2016)

水资源亏缺是宁夏农业可持续发展面临的主要挑战[1]，2022年宁夏耗水总量为3.96×10^9 m^3，其中农业耗水量为3.02×10^9 m^3，占总耗水的76.3%，宁夏农田灌溉水有效利用系数为0.57，而节水先进国家可高达0.7~0.8左右[2]。因此，发展高效节水农业，是转变农业生产方式、提高农业综合生产能力、促进节水、推动现代农业发展的关键举措[3]。近年来，宁夏坚持“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”的方针，建立一种与水资源承载力相适应的区域农业经济社会发展模式，为实现高质量农业发展提供支持。

自1997年Falkenmark等[4]提出“蓝水”与“绿水”概念。蓝水足迹表示作物生长过程中消耗地下水和地表水量，地表径流为主的水体。绿水足迹表示作物生长消耗储存在土壤中水的量，通常以有效降雨量表征[5]，其中蓝水足迹是农业广义水资源中的一个重要部分，二者具有互相制约、互相影响的作用，构成了一条连续的农业用水量谱系[6]。灰水足迹则是一种与污染相关的指数，它是指根据现行的环境质量标准和自然本底浓度，为使特定污染物负荷吸收同化所需要的淡水水量[7]。与传统的水资源利用指数相比，水足迹将蓝水、绿水和灰水纳入农业用水的评估范围，能够更全面地反映农业生产过程对水资源利用的影响。因此，基于农业水足迹综合分析农业生产过程中水资源消耗状况，可为区域高效节水提供数据支撑。

农业节水潜力对旱区农业生产、水资源高效利用及生态健康至关重要[8]。目前已有学者对农业节水潜力的形成机制[8]、理论框架体系[9]和计算方法等进行研究。周雯晶[10]计算作物的理论水分生产

收稿日期：2024-02-25； **修订日期：**2024-05-12

基金项目：宁夏留学回国人员创新创业项目(202303)；国家自然科学基金项目(42067022，41761066)；自治区教育厅高等学校科学研究项目(NYG2022083)资助

作者简介：高亚苗(1999-)，女，硕士研究生，主要从事水土资源高效利用与生态环境保护等方面的研究. E-mail: gaoym11@stu.nxu.edu.cn

通讯作者：王芳(1983-)，女，副教授，主要从事水土资源高效利用等方面的研究. E-mail: fangwang0820@nxu.edu.cn

率、理论灌溉效率与节水潜力;闫晨健等[11]基于蓝水和绿水水足迹分析陕西省典型年作物节水潜力;杨静等[12]基于水足迹评估农业水土资源的时空匹配动态趋势。当前,针对不同区域、不同作物的节水潜力研究已有一些成果,而从生产水足迹角度深入探讨作物节水潜力的研究还比较缺乏。

宁夏地处西北内陆,干旱和半干旱面积占全区总面积的75%以上,农业用水效率低下、降雨资源化水平不足以及化肥滥用等问题,严重制约和影响到宁夏地区的社会经济发展和生态安全[13]。鉴于此,本研究以地级市为研究单元,核算宁夏2006—2020年5种典型粮食作物生产水足迹,结合曼-肯德尔趋势检验法(Mann-Kendall)深入探究其时空演变趋势,进一步通过节水潜力模型估算典型年(丰水年、平水年和枯水年)农作物生产节水潜力,以期为宁夏大力发展节水农业,严格落实"四水四定"方案提供理论参考。

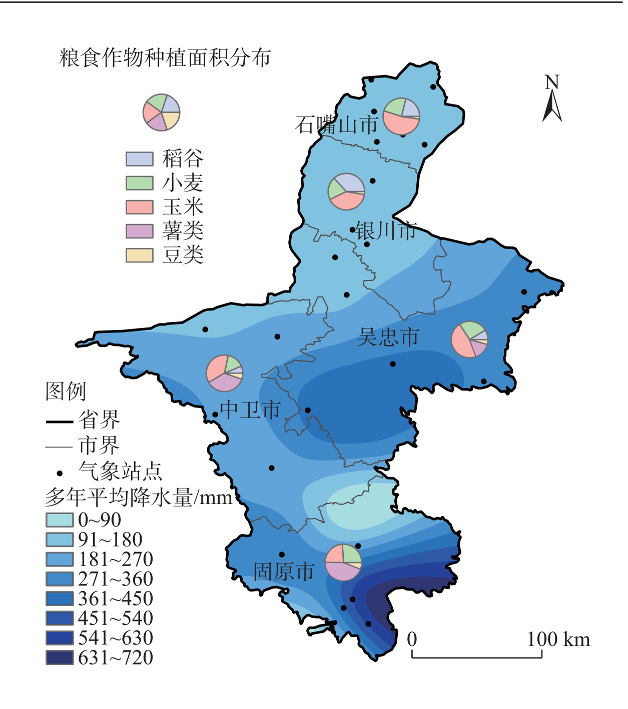
1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区(35°14′~39°23′N,104°17′~107°39′E)位于中国西北部黄河上游地区,属温带大陆性气候,水资源分布不均匀,各市平均气温为6.3~11.4 ℃,平均日照时数为2071~3086 h,是全国日照和太阳辐射最充足的地区之一[14],年平均降水量为164.1~647.3 mm(图1)。宁夏典型粮食种植作物有马铃薯、玉米、小麦、大豆和水稻等,截至2022年,宁夏全区农作物总播种面积为$1.78×10^6$ hm^2,其中固原市和吴忠市播种面积占比最高,分为30.24%和26.45%。2006—2020年宁夏5种典型粮食作物种植面积占全播种面积的64.6%,其中2006年和2020年分别占70.6%和57.8%。

1.2 数据来源

本文中降水量、蒸发量、气压、气温、地温、湿度、风速风向、日照时数等数据来自以中国气象科学数据中心(http://data.cma.cn)编制的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》[15]。种植面积、产量、降水量、氮肥等数据来源于宁夏统计年鉴[16]。作物系数和灌溉水利用系数来源于文献统计[17-18]。作物生产水足迹基准通过联合国粮农组织(FAO)推荐指标及Gao等[19]获得。采用《中国地表水环境质量标准》III类水标准的自然本底浓度和最大容许浓度数据[20]



注:基于自然资源部标准地图网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 宁夏作物平均种植面积比例及气象站点分布

Fig. 1 Proportion of average crop planting area and distribution of meteorological stations in Ningxia

进行灰水足迹计算。

1.3 研究方法

1.3.1 粮食作物水足迹测算 本文参考Hoekstra等[21]提出的水足迹计算方法来测算宁夏典型作物生产水足迹,作物需水量定义为参考作物蒸散发与作物系数的乘积,作物蒸散发量采用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式计算,具体见表1。

作物系数在作物生长过程中变化规律是前期由小逐渐增大,在作物生长旺盛时期达到最大(1.0左右),后期逐渐减小[26-27],具体数值参考表2。姬小敏[18]对宁夏灌溉水利用系数的影响因素进行研究,提出宁夏不同灌溉水利用系数,具体见表3。农田灌溉水利用系数反映了灌区工程状态、灌溉技术和管理水平等多方面的综合效应[28]。

1.3.2 时间序列趋势分析方法 Mann-Kendall检验法(简称M-K检验)是近年来兴起的一种非参数检验方法,适用于类型变量和顺序变量[29],被国内外众多学者应用于时序变化规律研究[30-31]。因此,本研究采用M-K检验,利用MATLAB软件对2006—2020年间宁夏各市内主要农作物的水足迹变化进行定量研究,同时以2006年为基准,分析2020年作

表1 宁夏典型粮食作物生产水足迹计算过程

Tab. 1 Calculation process of water footprint of typical grain crops in Ningxia

名称	计算方法	解释	意义
作物蒸散量[22]	$ET_0=\dfrac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\dfrac{900}{T+273}(e_a-e_b)}{\Delta+\gamma(1+0.34U_2)}$	ET_0为作物蒸发量；Δ为温度曲线斜率；R_n为净辐射；G为土壤热通量；γ为干湿度常数；T为日平均气温；e_a为饱和水汽压；e_b为实际水汽压；U_2为风速	评估区域内作物耗水和水资源的供求关系是不可或缺
粮食作物蒸散量[23]	$ET_c=K_c\times ET_0$	ET_c为不同作物蒸散量；K_c为作物系数	作物各生长阶段的需水比例
作物生长中有效降水量[24]	$P_e=\begin{cases}P(125-0.2P)/125, & P\leqslant 250\\125+0.1P, & P>250\end{cases}$	P_e为有效降水量；P为月降水量	作物生长期有效降水量
作物蓝、绿水蒸散发量	$ET_g=\min(ET_c,P_e)$ $ET_b=\max(ET_c-P_e,0)$	ET_g、ET_b分别为作物绿、蓝水蒸散发量	作物的蒸散发量直接影响其生产水足迹
粮食生产水足迹[25]	$WF_g=\dfrac{10ET_g}{Y}$ $WF_b=\dfrac{10ET_b+L}{Y}$ $L=10\alpha ET_b(1-\eta)/\eta$	WF_b、WF_g分别为蓝水足迹、绿水足迹；Y为作物单产；L为灌溉水输配过程中的水面蒸发损失；η为利用系数；α取5%	某一时段作物生产所需水的总消耗量
粮食生产灰水足迹[21]	$WF_{grey}=\dfrac{(\beta AR)/(C_{max}-C_{nat})}{Y}$	WF_{grey}为作物生产灰水足迹；β为淋失率；AR为作物氮肥折纯量；C_{max}为水体中氮（0.002 $kg\cdot m^{-3}$）最大容许浓度；C_{nat}为污染物的自然本底浓度（假设其数值为0）	氮肥是农业生产用水中最主要的污染物

表2 作物生长有效月份的作物系数

Tab. 2 Crop coefficient in effective months of crop growth

作物类型	4月	5月	6月	7月	8月	9月
小麦	0.40	1.15	1.15	1.15	1.15	0.40
玉米	0.60	0.47	0.95	1.15	1.10	0.57
水稻	0.90	0.85	1.33	1.48	1.36	0.95
大豆	–	0.45	0.89	1.11	0.92	0.55
薯类	0.32	1.11	1.11	1.11	0.74	0.74

表3 宁夏灌溉水利用系数

Tab. 3 Irrigation water utilization coefficient in Ningxia

年份	银川市	石嘴山市	吴忠市	固原市	中卫市
2006	0.416	0.393	0.594	0.580	0.379
2007	0.417	0.400	0.595	0.582	0.377
2008	0.410	0.370	0.578	0.567	0.370
2009	0.420	0.410	0.610	0.590	0.390
2010	0.420	0.420	0.598	0.588	0.370
2011	0.430	0.430	0.600	0.592	0.380
2012	0.440	0.440	0.602	0.612	0.388
2013	0.440	0.440	0.609	0.615	0.400
2014	0.450	0.440	0.610	0.618	0.410
2015	0.480	0.500	0.640	0.625	0.420
2016	0.520	0.500	0.618	0.632	0.440
2017	0.530	0.520	0.630	0.633	0.450
2018	0.540	0.540	0.638	0.634	0.470
2019	0.550	0.540	0.640	0.637	0.470
2020	0.560	0.560	0.648	0.640	0.480

物生产水足迹趋势。M-K检验分析过程如下：原假定H_0：时间序列数据（$x_1,x_2,\cdots,x_n$）为n个独立的、随机变量同分布样本；备择假设H_1是双边检验：对于所有的$i,j\leqslant n$，且$i\neq j$，x_i和x_j分布是不相同的[32]，检验统计量（S）计算为：

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i) \tag{1}$$

$$\mathrm{sgn}=\begin{cases}1, & x_j-x_i>0\\0, & x_j-x_i=0\\-1, & x_j-x_i<0\end{cases} \tag{2}$$

式中：在研究区域时间序列中x_j为第j年数值；x_i为第i年数值；n为数据采样长度，也是年数；sgn表示符号函数，通过以下公式来计算标准正态变量（当n>10时）[11]：

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S>0\\0, & S=0\\\dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, & S<0\end{cases} \tag{3}$$

式中：Var(S)为S的方差；Z为时间序列趋势统计量，Z>0表示增加趋势，Z<0表示减少趋势，Z的绝对值大于1.65、1.96和2.58时，分别表示通过了置信度为90%、95%和99%的显著性检验。

1.3.3 节水潜力计算 本文采用地方标准《基于作物生产水足迹调控的农业节水潜力评价通则》推荐

的计算方法[33]，评估了宁夏各市作物生产节水潜力，主要包括工程节水潜力和真实节水潜力。工程节水潜力是实施灌溉前后农业总用水量之差，以灌溉用水节水为主[34]，作物生产水足迹基准取值如表4。其计算公式为：

$$WSP_e=\left(\frac{WF_b\times Y\times S}{\eta}\right)-\left(\frac{WFB\times\frac{WF_b}{WF_b-WF_g}\times Y\times S}{\eta}\right) \quad (4)$$

式中：WSP_e 为宁夏作物生产工程节水潜力(m^3)；WF_b、WF_g分别为蓝水足迹、绿水足迹($m^3\cdot kg^{-1}$)；Y为作物单产($kg\cdot hm^{-2}$)；S为实际灌溉面积(hm^2)；WFB为作物生产水足迹基准($m^3\cdot kg^{-1}$)[35]；η 为灌溉水利用系数。

表4 作物生产水足迹基准

Tab. 4 Crop production water footprint benchmark /$m^3\cdot kg^{-1}$

作物类型	干旱区	湿润区
小麦	0.625	0.981
玉米	0.573	0.655
水稻	0.263	0.369
薯类	0.208	0.131
豆类	0.900	1.512

真实节水潜力指在农业生产过程中实施农业用水前后之差，将其进一步细分为蓝水真实节水潜力和绿水真实节水潜力，以更准确地评估节水效果[36]。步骤如下：

$$WSP_{a-b}=\left(WF_b-WFB\times\frac{WF_b}{WF_b-WF_g}\right)\times Y\times S \quad (5)$$

$$WSP_{a-g}=\left(WF_g-WFB\times\frac{WF_g}{WF_b-WF_g}\right)\times Y\times S \quad (6)$$

式中：WSP_{a-g} 为作物生产绿水节水潜力(m^3)；WSP_{a-b} 为作物生产蓝水节水潜力(m^3)。

2 结果与分析

2.1 粮食作物生产水足迹年际变化

宁夏作物单产大幅提升，生产水足迹显著增加，其典型作物生产蓝绿水足迹呈下降-上升-下降的波动变化趋势(图2)。在2006—2007年作物生产蓝绿水足迹逐渐下降，而2007—2008年又呈增加趋势，到2009年后整体降低。研究区间内，宁夏作物生产水足迹均值缩减20.71%，从3.43 $m^3\cdot kg^{-1}$降至2.72 $m^3\cdot kg^{-1}$。大豆和薯类在研究区间内生产蓝绿水足迹均值降幅最大，分别下降33.18%和30.40%，即分别从8.24 $m^3\cdot kg^{-1}$、4.61 $m^3\cdot kg^{-1}$下降至5.51 $m^3\cdot kg^{-1}$、3.21 $m^3\cdot kg^{-1}$。而小麦生产蓝绿水足迹均值上升42.69%，即从2.11 $m^3\cdot kg^{-1}$增至3.02 $m^3\cdot kg^{-1}$。

宁夏典型粮食作物生产水足迹总体呈下降趋势(表5)。研究区间各作物生产蓝水足迹均呈下降趋势，其中银川市玉米下降最明显，其M-K检验值为-3.66，2020年降至0.50 $m^3\cdot kg^{-1}$。大豆生产绿水足迹在石嘴山市、固原市和中卫市均通过了显著性检验，其中固原市下降了32.08%。薯类生产绿水足迹在各市均呈下降趋势(吴忠市未通过显著性检验)，而小麦生产绿水足迹在吴忠市和中卫市呈增加趋势。到2020年，银川市玉米生产绿水足迹下降23.53%，而固原市玉米绿水足迹增加至原来的10.34%。大豆和薯类(除银川市和石嘴山市外)生产灰水足迹在研究市区中均呈下降趋势且通过显著性检验。银川市小麦、玉米和水稻及吴忠市的水稻生产灰水足迹为下降趋势，其余市区呈增加趋势(除固原市外)，但未通过显著性检验。

2.2 粮食作物生产水足迹市际分布与演变

根据研究期间作物生产水足迹空间变化特点(图3~5)，宁夏各市区农作物生产的水足迹存在很大的差别。各市作物生产蓝水足迹均值范围为6.80~17.61 $m^3\cdot kg^{-1}$，市际标准差为均值的91.22%；作物生产绿水足迹均值范围为1.72~4.26 $m^3\cdot kg^{-1}$，市际标准差为均值的4.57%。银川市和石嘴山市在2020年大豆生产绿水足迹占比仍然高达85.58%。固原市大豆生产绿水足迹占比仅降低1.86%，而玉米生产绿水足迹上升5.12%。石嘴山市大豆生产蓝水足迹占比上升，其他作物为下降趋势，而吴忠市和中卫市小麦生产蓝水足迹占比上升，其余作物为下降趋势。图5展示了宁夏各市作物生产灰水足迹的空间分布和变化趋势，大豆生产灰水足迹最大，其分布范围为0.30~0.14 $m^3\cdot kg^{-1}$。灰水足迹分布最低的地区是固原市，2020年银川市和石嘴山市大豆生产灰水足迹贡献最高，分别高达76.54%和70.37%。

2.3 粮食作物节水潜力

以降水量频次为基础，确定研究区间典型的丰水年、平水年和枯水年，测算研究区域作物生产工

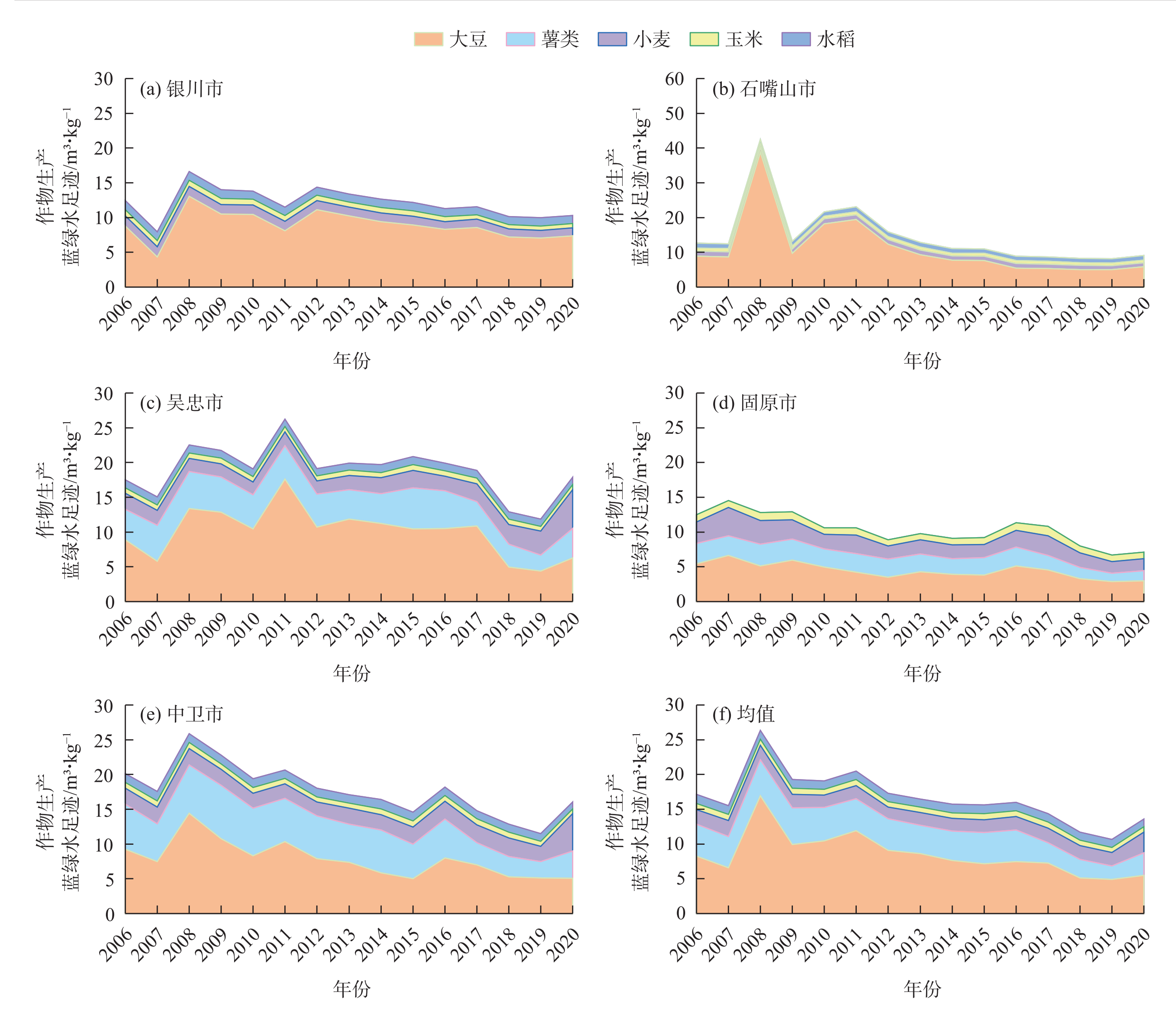


图2　宁夏典型粮食作物生产蓝绿水足迹

Fig. 2　Blue-green water footprint of typical grain crops in Ningxia

程节水潜力及真实节水潜力，并在此基础进行分析，如表6所示。总体来看，5种作物典型平均真实节水潜力大小为薯类(5.22×10^8 m^3)>水稻(3.51×10^8 m^3)>小麦(3.15×10^8 m^3)>玉米(2.22×10^8 m^3)>大豆(0.71×10^8 m^3)。大豆生产工程节水潜力、绿水节水潜力和蓝水节水潜力均在平水年最大，分别占比为42.07%、45.30%和45.00%，而薯类3种节水潜力均在枯水年最大，分别占比为42.15%、39.44%和49.60%。水稻生产3种节水潜力在丰水年最大，分别占比为36.05%、39.22%和35.96%。

图6显示了宁夏典型年节水潜力空间分布，银川市、吴忠市和固原市的节水潜力较大，其中固原市的节水潜力最大，节水潜力平均占全省节水潜力的26.52%，薯类对固原市节水潜力贡献率最大，占节水潜力的48.05%。银川市节水潜力仅次于固原市(22.18%)，吴忠市平均节水潜力占全市的21.98%。节水潜力较小的城市是中卫市和石嘴山市，仅占总节水潜力的16.70%、12.62%。

3　讨论

3.1　宁夏典型粮食作物生产水足迹变化趋势与原因分析

宁夏各市作物生产蓝绿水足迹的占比不同与气候条件、施肥习惯、灌溉率及技术、作物单产等密切相关[37]。图2表明各市大豆生产蓝绿水足迹占比不断缩小，其他作物的蓝绿水足迹不断增加。未来

表5 2006年和2020年作物生产水足迹及其M-K检验值

Tab. 5 Water footprints of typical grain crops and their M-K test values for 2006 and 2020

生产水足迹	作物类型	银川市			石嘴山市			吴忠市			固原市			中卫市		
		2006年	2020年	M-K检验值	2006年	2020年	M-K检验值	2006年	2020年	M-K检验值	2006年	2020年	M-K检验值	2006年	2020年	M-K检验值
蓝水足迹	大豆	6.96	5.04	−2.18**	7.32	4.16	−2.97*	7.34	3.82	−1.68***	3.86	1.89	−3.17*	7.75	3.82	−3.37*
	薯类	–	–	–	–	–	–	3.80	3.40	−2.47**	2.28	1.06	−3.66*	5.68	3.40	−3.37*
	小麦	1.23	1.04	−2.77*	1.26	1.08	−2.47**	2.03	5.05	2.28**	2.34	1.28	−3.07*	2.09	5.05	0.79
	玉米	0.72	0.50	−3.66*	0.73	0.57	−2.47**	0.66	0.55	−1.88***	0.78	0.61	−1.29	0.71	0.55	−1.88***
	水稻	1.13	1.00	−2.28**	1.33	1.15	−2.18**	1.01	0.87	−2.77*	–	–	–	1.16	0.87	−3.66*
绿水足迹	大豆	1.82	2.33	0.00	1.53	1.69	−2.57**	1.52	2.46	−0.69	1.59	1.08	−2.97*	1.51	1.23	−1.68***
	薯类	–	–	–	–	–	–	0.59	0.81	−0.59	0.65	0.40	−2.77*	0.81	0.55	−2.18**
	小麦	0.25	0.11	−0.69	0.21	0.11	−0.99	0.30	0.57	2.97*	0.69	0.48	−1.09	0.18	0.30	2.47**
	玉米	0.17	0.13	−2.08**	0.14	0.14	−0.59	0.12	0.17	0.49	0.29	0.32	1.68***	0.13	0.15	1.39
	水稻	0.15	0.15	0.00	0.15	0.17	−0.10	0.12	0.16	0.30	–	–	–	0.12	0.14	0.79
灰水足迹	大豆	0.08	0.05	−1.88***	0.08	0.07	−2.57**	0.04	0.03	−1.88***	0.01	0.01	−1.88***	0.05	0.02	−2.87*
	薯类	–	–	–	–	–	–	0.02	0.02	−2.77*	0.01	0.00	−2.38**	0.03	0.01	−4.16*
	小麦	0.01	0.01	−3.66*	0.01	0.01	0.40	0.01	0.03	1.39	0.01	0.01	−0.89	0.01	0.02	1.39
	玉米	0.01	0.00	−4.26*	0.01	0.01	0.30	–	–	–	0.00	0.00	0.79	0.00	0.00	0.30
	水稻	0.01	0.01	−2.67*	0.01	0.01	0.30	0.00	0.00	−1.68***	–	–	–	0.79	0.00	0.00

注：***、**、*分别表示通过99%、95%、90%的显著性检验。

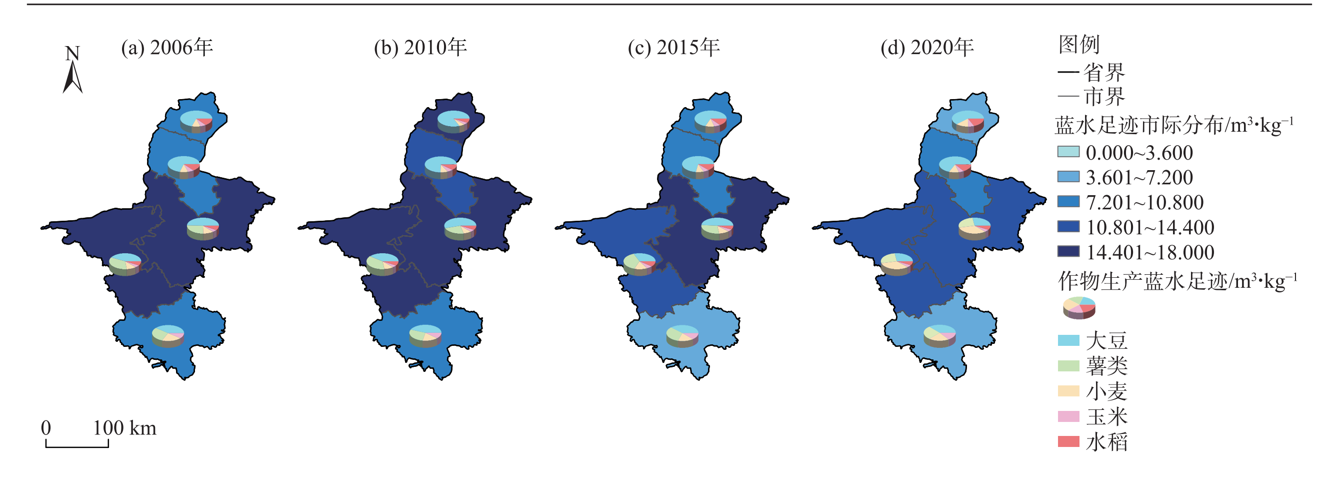


图3　2006—2020年宁夏粮食作物蓝水足迹空间分布特征

Fig. 3　Spatial distribution of blue water footprint of grain crops in Ningxia from 2006 to 2020

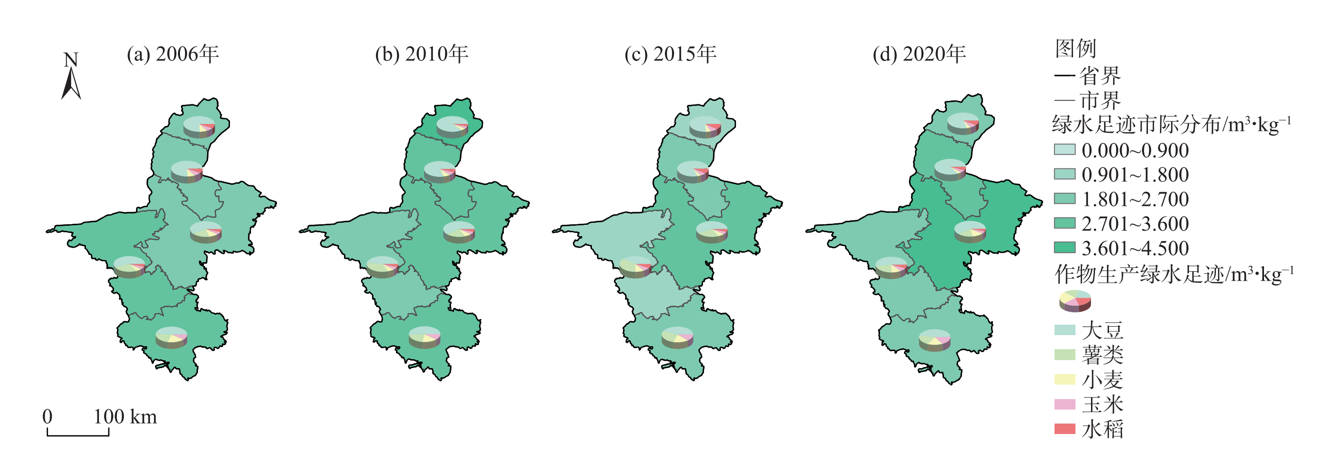


图4　2006—2020年宁夏粮食作物绿水足迹空间分布特征

Fig. 4　Spatial distribution of green water footprint of grain crops in Ningxia from 2006 to 2020

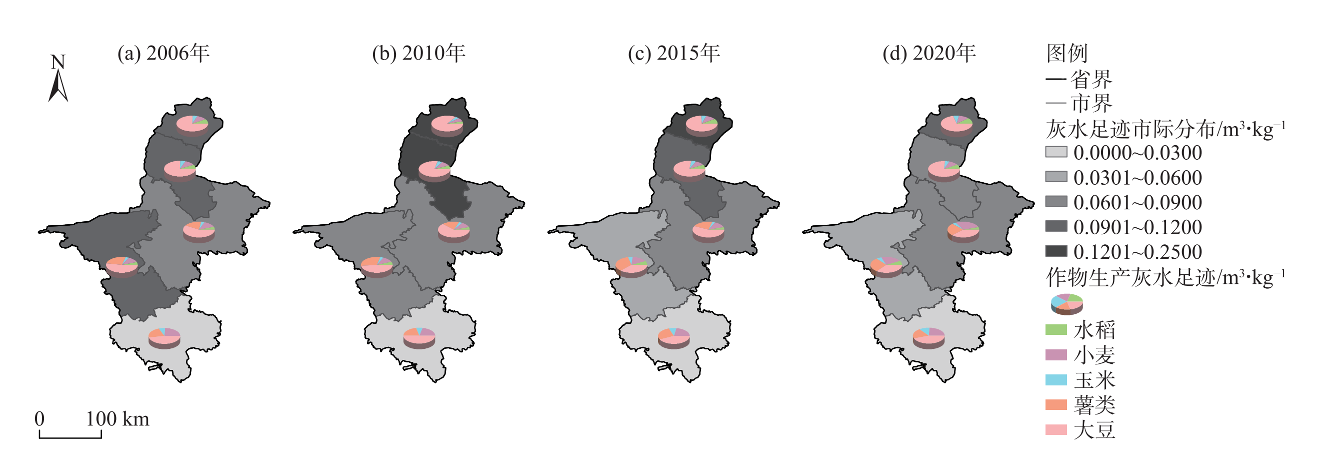


图5　2006—2020年宁夏粮食作物灰水足迹空间分布特征

Fig. 5　Spatial distribution characteristics of gray water footprint of grain crops in Ningxia from 2006 to 2020

随着农业水资源需求以及气候变化的影响,需要提高公众农产品节水意识,建立以水足迹为基础的生态补偿标准或机制。2008年作物生产蓝绿水足迹急剧增加的主要原因可能是由于该年度宁夏大部分地区降水量为1960年以来同期最少,南部山区3—6月累积降水量较历年同期偏少5成以上,玉米、马铃薯等秋粮作物生长缓慢,苗情较差,产量受到较大影响。

表6　宁夏粮食作物生产节水潜力值

Tab. 6　Water saving potential values of grain crop production in Ningxia　/10^8 m^3

作物类型	工程节水潜力			绿水节水潜力			蓝水节水潜力		
	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年	丰水年	平水年	枯水年
大豆	0.242	0.313	0.189	0.317	0.472	0.253	0.831	1.440	0.929
薯类	0.947	1.025	1.437	1.469	2.415	2.530	4.456	8.107	12.363
小麦	4.082	6.362	4.072	1.041	1.068	1.275	3.509	5.730	6.268
玉米	18.030	18.017	17.816	1.423	1.061	0.522	3.745	3.930	2.639
水稻	3.355	3.296	2.655	2.155	1.714	1.626	5.589	5.251	4.703
合计	26.657	29.013	26.170	6.405	6.730	6.207	18.131	24.458	26.900

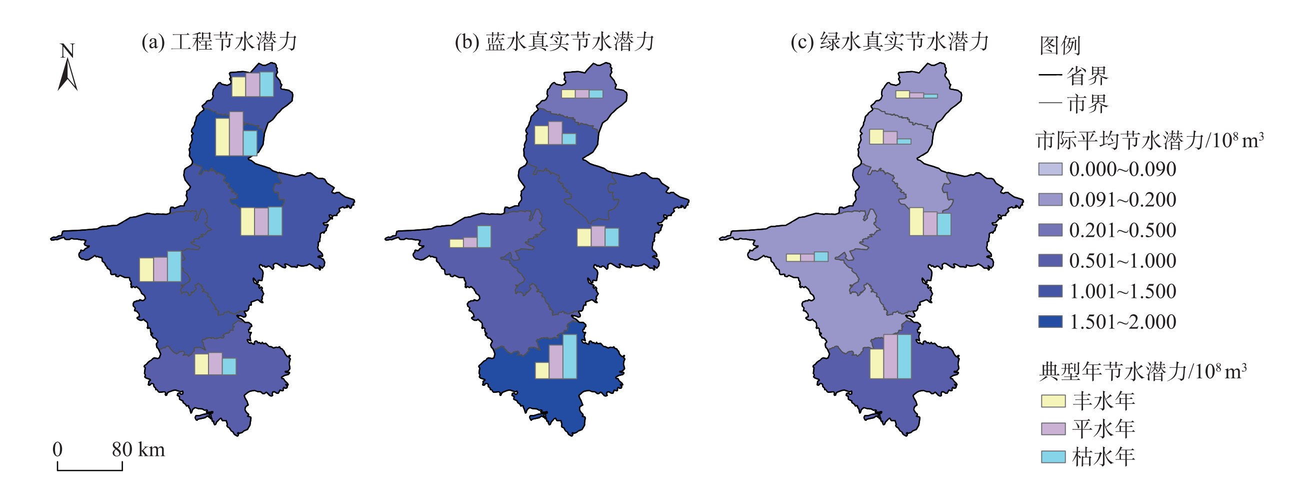


图6　宁夏作物生产节水潜力空间分布特征

Fig. 6　Spatial distribution characteristics of water-saving potential of crop production in Ningxia

宁夏各市区粮食作物生产灰水足迹的依次排序为石嘴山市>吴忠市>银川市>中卫市>固原市，如表5所示，通过显著性检验农作物产量灰水足迹都呈现递减趋势，银川市小麦、玉米和水稻及吴忠市的水稻生产灰水足迹为下降趋势，其余市区呈增加趋势（除固原市外），但没有通过显著性检验。这表明在宁夏作物种植中仍然存在大量的化肥和农药使用对农业面源产生污染，无疑增大了生态环境压力，科学施用化肥、农药不仅能促进粮食增产，还能促进农业的现代化，进而降低农田灰水足迹[37]。

宁夏作物生产水足迹是以蓝水足迹为主，绿水足迹为辅，这与其他学者研究结果一致[38-39]。小麦生产绿水足迹在中卫市和吴忠市呈增加趋势（表5），这与蒸散量和平均风速密切相关[40]。吴忠市和中卫市小麦生产蓝水足迹占比上升（图3），分别增加了23.23%和24.88%，反映了宁夏农业生产中以灌溉水为主，由于我国西北降水偏少，则农业用水以灌溉水和地下水为主。宁夏农业水资源的合理利用存在的问题，主要原因分为人为因素和自然条件。人为原因主要是农业水资源存在超采、乱采、乱用、乱排等行为，农业节水技术没有广泛推广[37]。自然原因主要是降雨直接影响到土壤中的水分储量，而蒸散发等过程又会对地下水位和地表径流产生重要影响。通过提高作物生长期内需水与地区降雨期的吻合度，可以更好地利用绿水资源，减少对蓝水资源的消耗，以实现水资源的有效管理和粮食生产的可持续发展[13]。

3.2　宁夏典型粮食作物节水潜力区域差异与变化分析

从研究结果来看，宁夏作物节水潜力最大的是玉米（7.46×10^8 m^3），最小的是大豆（0.55×10^8 m^3）。宁夏降水稀少、日照充足、蒸发量大，水资源相对短缺，薯类作物对用水需求的潜力最大，大力发展农业节水对解决当地水资源短缺，促进当地经济发展起着积极的推动作用[41]。固原市的节水潜力最大，但工程节水潜力最小。固原市因加强渠系工程条

件、渠系流量和运行条件、沿渠和全灌区土壤和地下水埋深条件、灌水方法和灌溉制度等，使得农业灌溉用水高效利用。作物节水潜力与水资源的可用性、地区的气候条件、土壤特性、农业技术、市场需求和政策导向密切相关，依据各地区的实际情况，发挥其种植优势，优化种植结构，进而大大提高当地水资源利用效率和节水潜力。

在未来研究中，将重点关注如何在粮食安全，以及生产稳定等多目标下，确立农作物用水资源科学利用量及节水潜力[42]，在此基础上，结合田间管理和生物节水技术，一定程度上缓解区域农业用水矛盾，防止水土流失，有效保护耕地质量，增加地下水补给能力，改善区域生态环境。

4 结 论

（1）研究期间，宁夏典型粮食作物生产水足迹呈现减小趋势（除小麦）。且作物生产蓝绿水足迹较高的作物（大豆）有明显的下降趋势，生产水足迹缩减33.18%。

（2）作物生产水足迹在区域间和市区间均有较大差异性。2006年大豆生产蓝绿水足迹均值为3.11 $m^3 \cdot kg^{-1}$，是玉米值的3.51倍，而在2019年下降至2.58倍。各市区玉米、水稻生产水足迹最小，而大豆生产水足迹较大；由于大豆单产急剧下降，2008年石嘴山市大豆生产水足迹最大。

（3）5种作物平均节水潜力大小排序为玉米>薯类>小麦>水稻>大豆。研究区间内固原市作物生产节水潜力最大，但其工程节水潜力最小。石嘴山市灌溉水利用系数增加幅度最大，增加了45.89%，而作物生产节水潜力最小，占全省11.50%。

（4）宁夏节水潜力较大，初步有以下两点建议：支持大中型灌区节水改造；精准施肥，减少环境压力。

参考文献（References）

[1] Hussain M I, Farooq M, Muscolo A, et al. Crop diversification and saline water irrigation as potential strategies to save freshwater resources and reclamation of marginal soils: A review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(23): 28695-28729.

[2] 宁夏回族自治区水利厅. 宁夏水资源公报[EB/OL]. [2023-07-24]. http://slt.nx.gov.cn/xxgk_281/fdzdgknr/gbxx/szygb/202307/t20230724_4190036.html. [Ningxia Water Conservancy. Ningxia Water Resources Bulletin[EB/OL]. [2023-07-24]. http://slt.nx.gov.cn/xxgk_281/fdzdgknr/gbxx/szygb/202307/t20230724_4190036.html.]

[3] 邓铭江, 王全九, 陶汪海, 等. 西北旱区现代农业提质增效发展模式探究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(4): 59-72. [Deng Mingjiang, Wang Quanjiu, Tao Wanghai, et al. Development model for improving the quality and efficiency of modern agriculture in the arid region of northwest China[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4): 59-72.]

[4] Falkenmark M, Kijne J M, Taron B, et al. Meeting water requirements of an expanding world population[J]. Philosophical Transactions: Biological Sciences, 1997, 352(1356): 929-936.

[5] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105-112. [Gao Jie, Wu Pute, Xie Pengxuan, et al. Distributed quantification of blue and green water resources and water footprint of crop production in an irrigation district at multiple temporal scales[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 105-112.]

[6] 吴普特, 卓拉, 刘艺琳, 等. 区域主要作物生产实体水-虚拟水耦合流动过程解析与评价[J]. 科学通报, 2019, 64(18): 1953-1966. [Wu Pute, Zhuo La, Liu Yilin, et al. Assessment of regional crop-related physical-virtual water coupling flows[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(18): 1953-1966.]

[7] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(9): 3232-3237.

[8] 翟家齐, 赵勇, 刘宽, 等. 干旱区灌溉绿洲农业节水潜力形成机制与评估方法[J]. 水利学报, 2023, 54(12): 1440-1451. [Zhai Jiaqi, Zhao Yong, Liu Kuan, et al. Formation mechanism and evaluation method of agriculture water-saving potential in irrigated oasis in arid regions[J]. Jurnal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(12): 1440-1451.]

[9] 曹连海. 基于水足迹理论的灌区农业节水潜力研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014. [Cao Lianhai. Study on agriculture water-saving potential of irrigation district based on water footprint theory[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014.]

[10] 周雯晶. 中国主要农作物的理论灌溉效率及其节水潜力研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. [Zhou Wenjing. Theoretical irrigation efficiency and water saving potential of main crops in China[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018.]

[11] 闫晨健, 栗萌, 卓拉, 等. 1989—2019年陕西省作物生产水足迹时空演变与节水潜力评价[J]. 资源科学, 2023, 45(1): 158-173. [Yan Chenjian, Li Meng, Zhuo La, et al. Spatiotemporal evolution of water footprint and water-saving potentials of crop production in Shaanxi Province during 1989—2019[J]. Resources Science, 2023, 45(1): 158-173.]

[12] 杨静, 周冬梅, 马静, 等. 疏勒河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 982−992. [Yang Jing, Zhou Dongmei, Ma Jing, et al. Spatial and temporal matching characteristics of agricultural land and water resources in the Shule River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 982−992.]

[13] 陶汪海, 邓铭江, 王全九, 等. 西北旱区农业高质量发展体系的生态农业内涵与路径[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 221−232. [Tao Wanghai, Deng Mingjiang, Wang Quanjiu, et al. Ecological agriculture connotation and pathway of high-quality agricultural development system in northwest arid region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 39(20): 221−232.]

[14] Li Y, Conway D, Wu Y, et al. Rural livelihoods and climate variability in Ningxia, northwest China[J]. Climatic Change, 2013, 119 (3−4): 891−904.

[15] 国家气象信息中心. 中国地面气候资料日值数据集(V3.0)[EB/OL]. [2024−02−02]. http://data.cma.cn/data/cdc-detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html. [National Meteorological Information Center. Daily ground climate (V3.0)[EB/OL]. [2024−02−02]. http://data.cma.cn/data/cdc-detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.]

[16] 宁夏回族自治区人民政府. 宁夏统计年鉴[DB/OL]. [2023−10−27]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/zfxxgk/fdzdgknr/tjxx_40901/tjnj/. [Ningxia Hui Autonomous Region People's Government. Ningxia statistical yearbook[DB/OL]. [2023−10−27]. https://www.nx.gov.cn/zwgk/zfxxgk/fdzdgknr/tjxx_40901/tjnj/.]

[17] 罗静怡, 东梅. 水足迹视角下宁夏粮食生产用水绿色效率研究−基于非期望产出的三阶段SBM-Malmquist指数[J/OL]. [2024−08−05].中国农业资源与区划. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20221031.1336.028.html. [Luo Jingyi, Dong Mei. Research on the green efficiency of water use for grain production in Ningxia from the perspective of water footprint-three-stage SBM-Malmquist index based on unexpected output[J/OL]. [2024−08−05]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20221031.1336.028.html.]

[18] 姬小敏. 宁夏灌溉水利用系数影响因素研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. [Ji Xiaomin. Study on the influencing factors of irrigation water utilization coefficient in Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[19] Gao J, Zhuo L, Liu Y, et al. Efficiency and sustainability of inter-provincial crop-related virtual water transfers in China[J]. Advances in Water Resources, 2020, 138: 103560, doi: 10.1016/j.advwatres.2020.103560.

[20] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国地表水环境质量标准[EB/OL]. [2022−11−06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Environmental quality standards for surface water of the People's Republic of China[EB/OL]. [2022−11−06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.shtml.]

[21] Hoekstra A, Chapagain A, Aldaya M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard[M]. Washington: Earthscan, 2011: 7−68.

[22] 陈绍民, 李晓丽, 杨启良, 等. 基于机器学习的遮荫设施内参考作物蒸散量估算[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 108−116. [Chen Shaomin, Li Xiaoli, Yang Qiliang, et al. Estimation of reference evapotranspiration in shading facility using machine learning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 108−116.]

[23] 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650−658. [Shi Lijie, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 650−658.]

[24] Döll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1037, doi: 10.1029/2001WR000355.

[25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements: FAO irrigation and drainage 56[M]. Rome: FAO, 1998: 7−207.

[26] 玉苏甫·买买提, 阿热孜古丽·图尔荪, 艾萨迪拉·玉苏甫. 渭−库河三角洲绿洲农作物需水量分析[J]. 节水灌溉, 2015(11): 85−88. [Mamat Yusup, Tursun Arzigul, Yusup Asadilla. Analysis of crop water requirement in Weigan-Kuqa River Delta Oasis of Xinjiang[J]. Water Saving Irrigation, 2015(11): 85−88.]

[27] 赵丹. 黑龙江省农业水土资源系统脆弱性测度及种植结构调控优化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022. [Zhao Dan. Vulnerability evaluation and planting structure regulation and optimization of agricultural soil and water resources system in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.]

[28] 范星, 陈彬. 三江平原粮食作物生产水足迹时空特征及影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6368−6380. [Fan Xing, Chen Bin. Spatio-temporal patterns and influencing factors of the water footprint of grain crop production in the Sanjiang Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6368−6380.]

[29] Mann H B. Non-parametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245−259.

[30] 甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1824−1834. [Gan Rong, Xu Mengsha, Zuo Qiting. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1824−1834.]

[31] 李慧娟, 师长兴, 马小晴, 等. 黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 499−507. [Li Huijuan, Shi Changxing, Ma Xiaoqing, et al. Quantification of the influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 499−507.]

[32] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. CMIP5模式对西北干旱区典型流域

气温模拟能力评估——以开都-孔雀河为例[J]. 资源科学, 2019, 41(6): 1141-1153. [Li Xiaofei, Xu Changchun, Li Lu, et al. Evaluation of air temperature of the typical river basin in desert area of northwest China by the CMIP5 models: A case of the Kaidu-Kongqi River Basin[J]. Resources Science, 2019, 41(6): 1141-1153.]

[33] 杨凌示范区市场监督管理局. 基于作物生产水足迹调控的农业节水潜力评价通则: DB6111/T183-2021[EB/OL]. [2022-08-23]. https://www.eiacloud.com. [Market Supervision and Administration Bureau of Yangling Demonstration Zone. General rules for agricultural water saving potential evaluation based on water footprint regulation of crop production: DB6111/T183-2021[EB/OL]. [2022-08-23]. https://www.eiacloud.com.]

[34] 刘路广, 崔远来, 王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 696-702. [Liu Luguang, Cui Yuanlai, Wang Jianpeng. New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 696-702.]

[35] Zhuo L, Mekonnen M M, Hoekstra Y A. Benchmark levels for the consumptive water footprint of crop production for different environmental conditions: A case study for winter wheat in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(11): 4547-4559.

[36] 刘鑫钰. 基于水-碳足迹的叶尔羌河灌区作物可持续生产研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023. [Liu Xinyu. Research on sustainable crop production in Yarkant River Basin irrigated district based on water footprint and carbon footprint[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2023.]

[37] 聂汉林, 樊良新, 郭琎, 等. 县域尺度下关中地区农作物水足迹时空特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 339-352. [Nie Hanlin, Fan Liangxin, Guo Jin, et al. Spatial and temporal characteristics of crop water footprint and influencing factors in Guanzhong region at the county scale[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 339-352.]

[38] 高海燕, 李王成, 李晨, 等. 宁夏主要农作物生产水足迹及其变化趋势研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 110-118. [Gao Haiyan, Li Wangcheng, Li Chen, et al. Water footprints of main crops and their change in Ningxia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 110-118.]

[39] 齐娅荣, 张嗣曌, 唐莲, 等. 宁夏固原市主要农作物生产水足迹分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 91-96, 103. [Qiao Yarong, Zhang Sizhao, Tang Lian, et al. Analysis of water footprint of main crop production in Guyuan, Ningxia[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020, 31(1): 91-96, 103.]

[40] 郭相平, 高爽, 吴梦洋, 等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295-302. [Guo Xiangping, Gao Shuang, Wu Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(5): 295-302.]

[41] 张家欣, 邓铭江, 李鹏, 等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 131-140. [Zhang Jiaxin, Deng Mingjiang, Li Peng, et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in northwest China from the perspective of virtual water flow[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 131-140.]

[42] 褚家琦, 蒋志辉. 新疆农业水资源绿色效率时空演变及影响因素研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1231-1241. [Chu Jiaqi, Jiang Zhihui. Spatiotemporal evolution and influencing factors of green efficiency of agricultural water resources in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1231-1241.]

Spatio-temporal evolution of water footprint of typical grain crops and evaluation of water-saving potential in Ningxia

GAO Yamiao[1,2], CHEN Haonan[1,2], WANG Fang[1,2,3], NAN Xiongxiong[3], CHEN Hongxiang[4], LI Wenhui[1,2]

(1. School of Geographical Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Region, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 4. College of Resources, Environment and Life Sciences, Ningxia Normal University, Guyuan 756000, Ningxia, China)

Abstract: In recent years, the grain and vegetable production capacity of Ningxia Hui Autonomous Region (Ningxia) has increased significantly. However, as one of the most water-scarce provinces in China, evaluating the water footprint of agricultural production and its water-saving potential is crucial for promoting the sustainable use of agricultural water resources. Focusing on the production water footprint of five typical food crops, this study explored the spatiotemporal evolution trends of the production water footprint in the region from 2006 to 2020 using the Mann-Kendall trend test. Additionally, a water-saving potential model was employed to further analyze the water-saving potential of these crops. The results indicated that: (1) The production water footprint of typical grain crops in Ningxia exhibited a decreasing trend over the past 15 years, with the production water footprint in Guyuan City decreasing by 42.97%. (2) The blue water and gray water footprints of each crop showed a consistent downward trend, while the green water footprint of the same crop varied significantly across cities, with soybean contributing the most to the green water footprint. (3) The water-saving potential of crop engineering, true water-saving potential of blue water and true water-saving potential of green water could reach 44.81%, 46.43% and 45.10%, respectively, in typical year crop production projects. These findings provide a theoretical foundation for the sustainable development of water-saving agriculture in Ningxia.

Key words: crop production water footprint; spatiotemporal evolution; water saving potential; Ningxia